

Schlussbericht

Zahlungsempfänger: IHP – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik, Im Technologiepark 25
15236 Frankfurt (Oder)

Förderkennzeichen:
03IS2151G

Vorhabenbezeichnung: Ausbau des Kompetenzzentrums Dünnschicht und Nanotechnologie für Photovoltaik Berlin, **Kurzname:** Ausbau PVcomB, **Teilvorhaben 6:** Analytik

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2010 - 31.12.2014

Berichtszeitraum:

1.1.2010 - 31.12.2014

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war der Aufbau eines instituts- und standortübergreifenden Analysenetzwerks für Dünnschichtsolarzellen, um, durch die Kombination einer Vielzahl von in der Halbleiterindustrie etablierter Methoden mit neuentwickelten Messverfahren und begleitenden theoretischen Simulationen, neue Ansätze und Wege zur Wirkungsgradsteigerung von Silizium und CIS basierten Dünnschichtsolarzellen zu entwickeln. Dabei stand besonders die Unterstützung anderer Teilnehmer des Forschungsverbunds durch Entwicklung des Angebotes eines Analyseservice im Vordergrund. Die sich so einstellenden Synergieeffekte sollten genutzt werden um siliziumbasierte Dünnschichtsolarzellen zu entwickeln deren Wirkungsgrad 12% und CIS-basierte deren Wirkungsgrad 15% übersteigen. Als Endziel wurde die Entwicklung eines fertigungsbegleitenden Analysesystems benannt.

1.2 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

In der Laufzeit des Projektes wurde für die jeweiligen Teilprojekte mit einer Vielzahl an Institutionen kooperiert. Im Folgenden eine Aufstellung der einzelnen Forschungen und die Art der Zusammenarbeit:

Festphasenkristallisiertes Polykristallines Silizium

Die Entwicklung der Solarzellen am Helmholtz-Zentrum Adlerhof wurde vom IHP mit Hall, ToF-SIMS und TEM Messungen am IHP sowie mit TEM Untersuchungen, die von einem IHP Mitarbeiter am Helmholtz-Zentrum Wannsee durchgeführt wurden, unterstützt.

Entwicklung Cadmiumfreie Pufferschichten für CIGSSe Solarzellen

Die Kooperation von dem Helmholtz-Zentrum Wannsee und Bosch Solar CISTech GmbH zur Entwicklung cadmiumfreier Pufferschichten konnte durch das IHP erfolgreich mit Untersuchungen der lokalen Zusammensetzung mit TEM unterstützt werden.

Nanokristallines SiO_x für Solarzellen

Für ein besseres Verständnis der SiO_x basierten Funktionsschichten, die am PVcomB entwickelt werden, wurden umfangreiche Messungen am IHP durchgeführt und vom IHP aus weiterführende Kooperationen mit dem Helmholtz-Zentrum Wannsee und der Technischen Hochschule Wildau initiiert.

Analyse Service

Der im Rahmen des Projektes am IHP etablierte Analyse Service wurde von einer Reihe an Projektpartnern aus Industrie und Wissenschaft genutzt:

- PVcomB
- Masdar PV GmbH
- Bosch Solar CISTech GmbH
- Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
- Helmholtz-Zentrum Wannsee
- Helmholtz-Zentrum Adlershof
- Brandenburgische Technische Universität
- Technische Universität Berlin

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

Im Vordergrund stand bei dem Projekt eine verlässliche Analytik für die anderen Projektpartner aufzubauen und ihre Forschungen an den verschiedensten Teilbereichen der Dünnschichtsolarzellen effizient zu unterstützen. Die einzelnen Projekt und die Art der wissenschaftlichen Zusammenarbeit werden im Folgenden dargestellt.

Festphasenkristallisiertes Polykristallines Silizium

Als ein vielversprechender Kandidat für kosteneffektiv herzustellende Siliziumzellen wird Festphasenkristallisiertes Polykristallines Silizium (engl. *solid phase crystallized* [SPC]) gehandelt. Dabei wird eine zuerst aufgebrachte Schicht amorphen Siliziums bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen (600°C) unter einer Schutzgasatmosphäre kristallisiert. Die Optimierung und der Vergleich verschiedener Annealingschritte wurden mit mikrostrukturellen, chemischen und elektrischen Charakterisierungen unterstützt. So wurde unter anderem untersucht ob andere Annealingmethoden wie das Zonenschmelzverfahren oder das Laserannealing bei höherer Temperatur einen Einfluss auf die Versetzungsdichte haben.

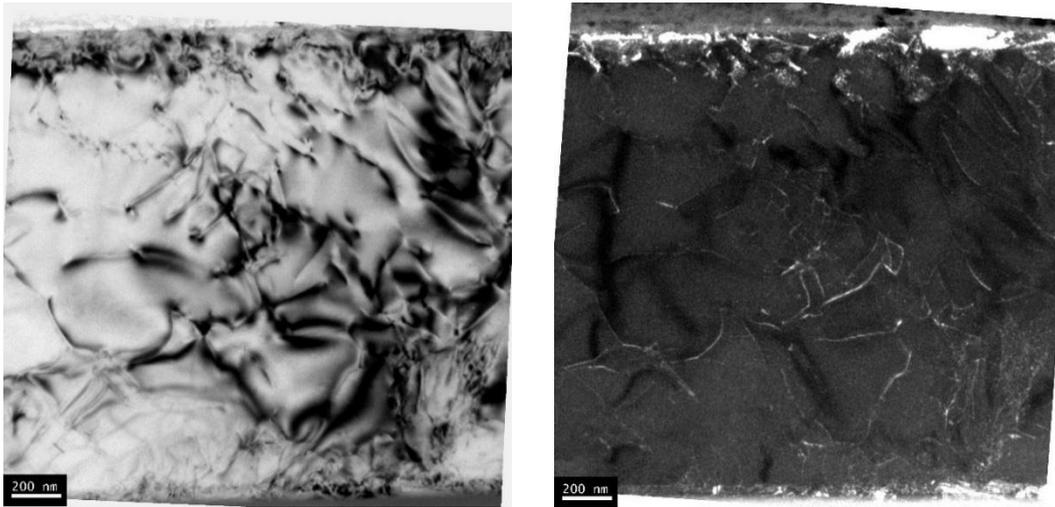


Abb. 1) Abbildung in Zweistrahl Bedingung vor und nach Einschalten der Dunkelfeldspulen

Es ist bekannt, dass Kristalldefekte wie Stapelfehler und besonders Versetzungen den Wirkungsgrad von Solarzellen beschränken. Verschiedene in der Transmissionselektronenmikroskopie etablierte Methoden kamen zum Einsatz, um die Einflüsse von verschiedenen Annealing Behandlungen auf die Kristallstruktur zu untersuchen. Die Versetzungsdichten der Proben wurde mit Weak Beam Darkfield (WBDF) Abbildungen nach der von J.W. Steeds vorgeschlagenen Methode bestimmt. Dafür wurden bei mehreren Kristalliten jeder Probe unterschiedliche Bragg Bedingungen eingestellt und die entsprechenden Abbildungen ausgewertet und gemittelt (siehe Abb. 1). WBDF Untersuchungen zeigten zudem eine große Anzahl an Stapelfehlern. Eine genauere Untersuchung mit hochauflösenden TEM (HRTEM) ergab, dass es sich dabei vornehmlich um Mikrozwillinge entlang der $[112]$ Achse handelt (siehe Abb. 2). Um eine belastbare Statistik zu gewinnen wurden in der Folgezeit große Probenbereiche in unterschiedlichen Orientierungen untersucht. Mit mehreren STEM Serien konnte eine eindeutige Abnahme der Stapelfehlerdichte festgestellt werden. Dabei konnte außerdem beobachtet werden, dass die Stapelfehler in der PECVD abgeschieden n^+ Schicht durch den RTP Schritt nicht ab, sondern tendenziell eher zunehmen und nahezu auf die n^+ Schicht beschränkt sind (siehe Abb. 3).

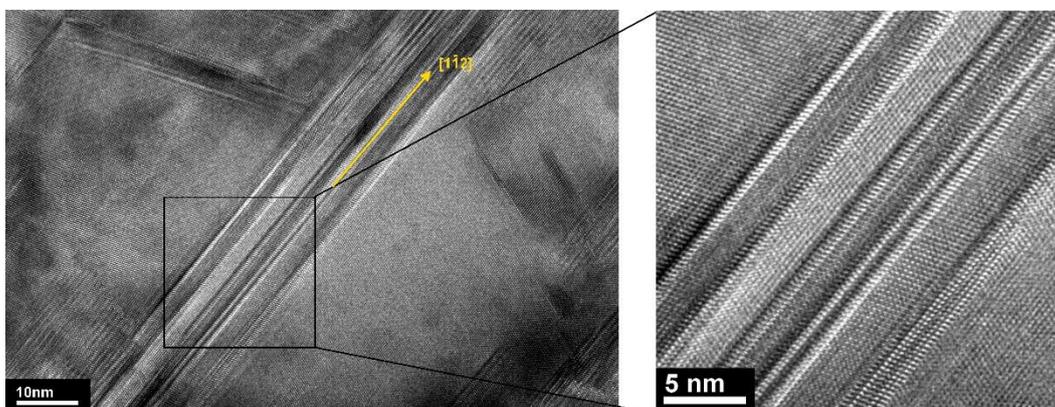


Abb. 2 $[110]$ orientierte HRTEM Aufnahme eines typischen Mikrozwillinges

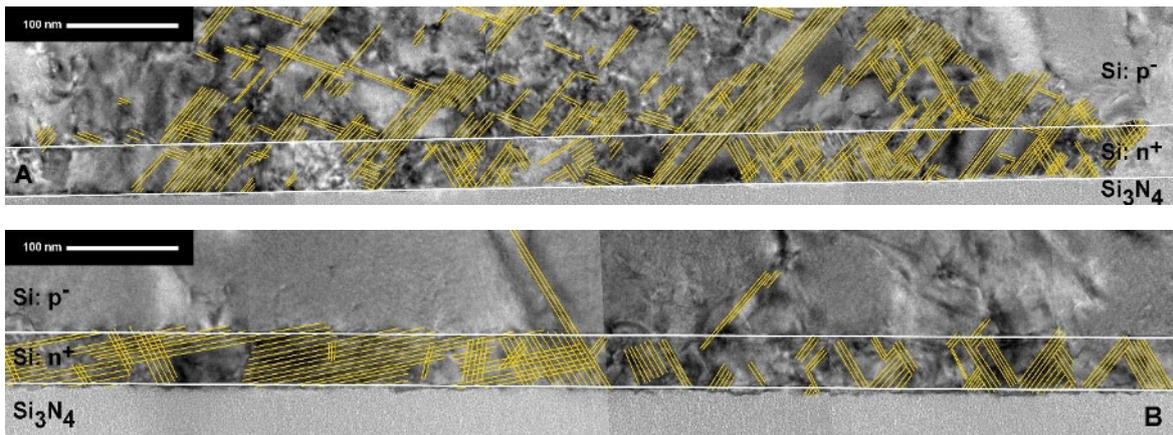


Abb. 3) STEM Abbildung von Stapelfehlern vor und nach dem RTP Schritt

Wirkungsgrad bei der Anwendung verschiedener Annealingmethoden:

Untersucht wurde daraufhin, ob bei dem Heizprozess Verunreinigungen beispielsweise durch die verwendete Schutzgasatmosphäre in das Material eingebracht wurden und in was für einem Umfang es zu möglichen Diffusionsprozessen in Abhängigkeit von der Temperatur und der verwandten Methode kommt. Hierfür kam die bereits gut etablierte ToF-SIMS Analysemethode (siehe Abb. 4) zur Anwendung. Dabei wurden signifikante Unterschiede hinsichtlich des Effektes verschiedener Annealingmethoden auf die Elementverteilung innerhalb der Schicht gefunden. Für eine weitere Einschätzung der Auswirkungen wurde eine Messreihe mit der Halleffekt Anlage am IHP gemessen. Hierbei war eine weitere Anpassung der Methode notwendig, da es nicht möglich war mit dem sonst genutzten Indium das Silizium Material in ausreichender Qualität zu kontaktieren. Das Problem konnte mit dem Aufdampfen von Aluminium als Kontakt weitestgehend gelöst werden. Dennoch bleibt das SPC poly-Silizium ein höchst anspruchsvolles Material für die erfolgreiche Präparation für Halleffekt Messungen, bei dem auch mit mehreren Versuchen und sorgfältigster Aufbringung der Kontakte eine erfolgreiche Messung nicht automatisch garantiert ist. Trotz dieser Widrigkeiten konnte ein klarer Trend beobachtet werden (siehe Abb. 5). Eine hohe Heiztemperatur wirkt sich positiv

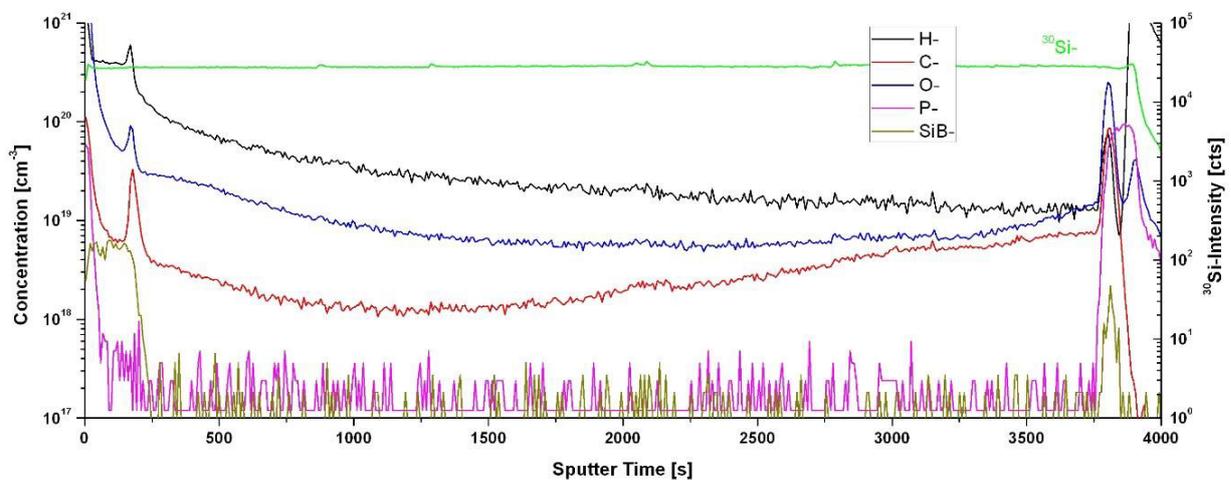


Abb.4) ToF-SIMS Profil eines SPC-Silizium Absorbers

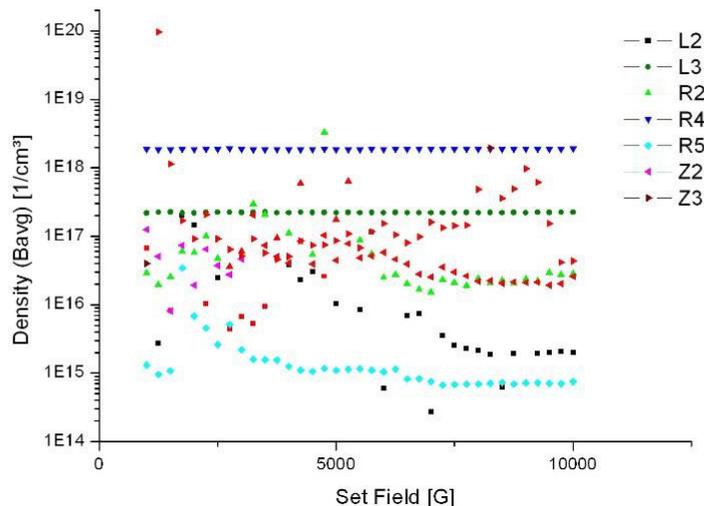


Abb. 5) Vergleich von Annealing Methoden anhand der Ladungsträgerdichten in poly-Silizium

auf die Konzentration freier Ladungsträger aus. Gleichzeitig ist eine Begrenzung der Temperatur des Substrats erwünscht ist, so dass die Solarzelle keinen Schaden nimmt. Genau darin liegt der Vorteil des Laserannealings, da ein definierter Energiebetrag in das Material eingebracht wird und nahezu ausschließlich die Siliziumschicht aufgeheizt wird.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen mit Ergebnissen dieser Arbeiten:

„Impact of dislocations and dangling bond defects on the electrical performance of crystalline silicon thin films“

S. Steffens, C. Becker, D. Amkreutz, A. Klossek, M. Kittler, Y. Chen, A. Schnegg, M. Klingsporn, D. Abou-Ras, K. Lips, B. Rech in Applied Physics Letters, 105, 022108, 2014

„Microstructural Changes in Polycrystalline Si Thin Film Solar Cells Induced by Rapid Thermal Annealing“

M. Klingsporn, S. Steffens, C. Becker, M. Schubert, I. Costina, D. Abou-Ras at European Material Research Society, Spring Meeting 2012

Entwicklung Cadmiumfreie Pufferschichten für CIGSSe Solarzellen

Obwohl Solarzellen zurzeit noch von den Restriction of Hazardous Substances Directive (RoHS) Bestimmungen ausgenommen sind, ist es dennoch nicht zuletzt aus Gründen des Umweltschutzes von großem Interesse eine Pufferschicht ohne Cadmium zu entwickeln. Dabei soll die Performance ein vergleichbares Niveau von

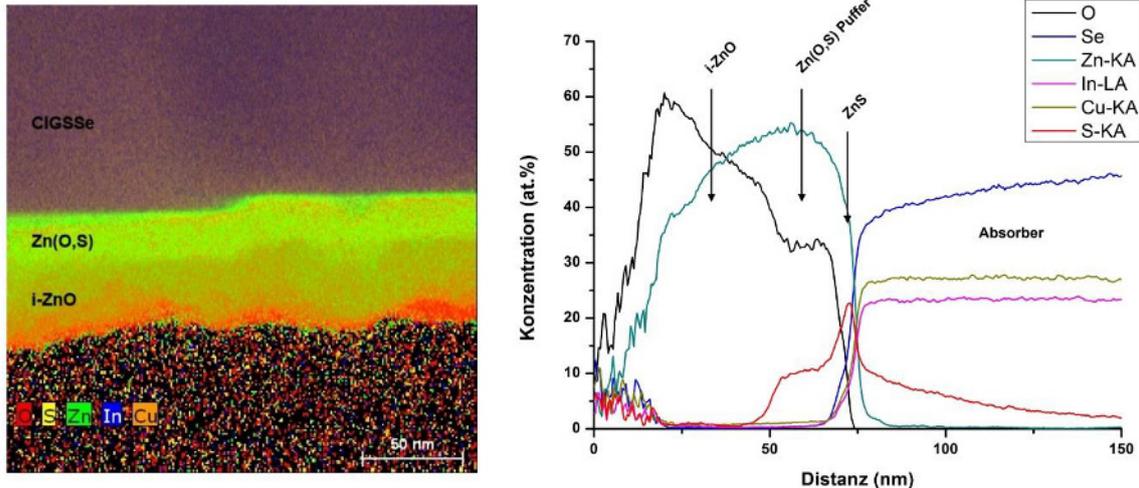


Abb. 6) STEM-EDX Mapping und ein Linescan des i-ZnO / Zn(O,S) Schichtsystems

Zellen mit Cadmiumsulfid Pufferschichten erreichen. In der Vergangenheit konnte von mehreren Gruppen demonstriert werden, dass Zn(O,S) für diesen Zweck ein vielversprechendes Material ist. Besonders die mit dem Atomic Layer Deposition (ALD) Verfahren hergestellte Schichten wiesen eine hohe Qualität und damit gute Wirkungsgrade auf. Der Nachteil dieser Methode ist die vergleichsweise geringe Depositionsgeschwindigkeit, was dem industriellen Einsatz bisher im Wege steht. Am Helmholtz Zentrum Berlin wird an neuen Ansätzen in der ALD Technik gearbeitet, um eine schnellere Deposition zu ermöglichen und sie für den industriellen Einsatz zur Herstellung von Chalkopyritzellen nutzbar zu machen. Die Zn(O,S) Schicht der untersuchten Solarzelle wurde auf einem Absorber von Bosch Solar bei einer Temperatur von 130°C abgeschieden. Zusätzlich wurde eine i-ZnO Schicht aufgebracht. Die so hergestellten Zellen erreichten Wirkungsgrade bis zu 16,1% was in Anbetracht der mit CdS Puffer zum Vergleich hergestellten Zellen, die maximal 16,9% erreichten, als sehr gut bezeichnet werden kann. Am IHP wurde TEM Lamelle mit STEM EDX untersucht, um die Schichtdicke und -homogenität sowie die für ALD äußerst wichtigen Grenzflächen zu charakterisieren. Zuerst wurde an mehreren Stellen der Zelle jeweils ein EDX Mapping aufgenommen (siehe Abb. 6) und ein Linien Profil daraus extrahiert. In Abbildung 7 ist zu sehen, dass die Schichtdicken 26 und 34 nm sind, für Zn(O,S) und i-ZnO mit den 280 respektive 334 ALD-Zyklen bei Abscheidung korrespondieren. Ebenso konnte bestätigt werden, dass die Homogenität und die Zusammensetzung der Zn(O,S) Schicht im angestrebten Bereich liegt. Zudem konnte in einigen Profilen eine leichte Diffusion von Zink den Absorber und die Ausbildung einer Lage ZnS an der Grenzfläche zum Absorber festgestellt werden.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen mit Ergebnissen dieser Arbeiten:

„Above 16% efficient sequentially grown Cu(In,Ga)(Se,S)₂ based solar cells with atomic layer deposited Zn(O,S) buffers“

S. Merdes, F. Ziem, T. Lavrenko, T. Walter, I. Lauermann, M. Klingsporn, S. Schmidt, F. Hergert, R. Schlatmann in Progress in Photovoltaics: Research and Application 2015

Nanokristallines SiO_x für Solarzellen

In den letzten Jahren rückte nanokristallines als Material für die Verwendung in Funktionsschichte wie z.B. als Intermediate Reflector Layer (IRL) in den Fokus der Forschung. Am PVcomB wurde SiO_x erfolgreich in die Herstellung von mikromorphen Tandem Solarzellen integriert. Nach Voruntersuchung wurde beschlossen eine umfangreiche Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Parametern Raman Kristallinität, Mikrostruktur, Phasenseparation und ihren Einfluss auf die elektrische Performance der Solarzelle durchzuführen. Von besonderem Interesse dabei ist es auch ein tieferes Verständnis der physikalischen und chemischen Vorgänge während des Depositionsprozesses zu erlangen. Es wurden

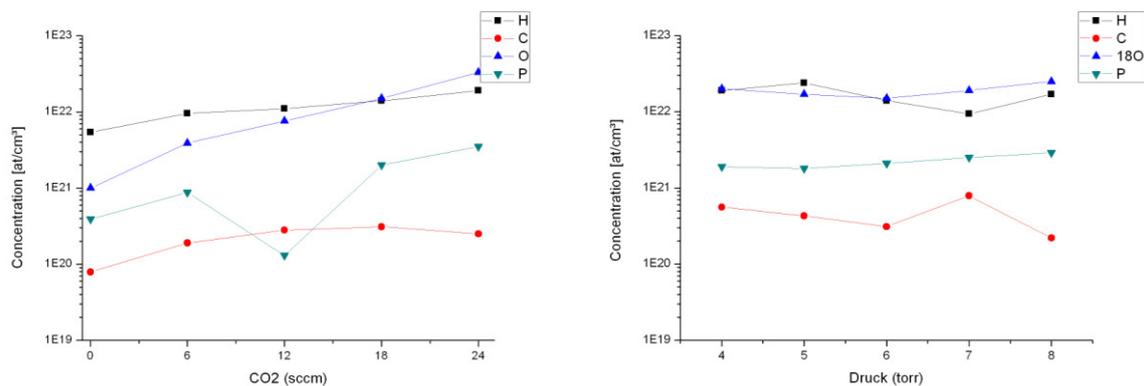


Abb. 7) Konzentrationen relevanter Elemente in den SiO_x, links: Zellen, rechts: Einzelschichten

eine Probenserie geplant und am PVcomB von Simon Kirner hergestellt. Die Kristallinität wurde durch Änderung des Depositionsdrucks variiert. Hierbei liegt in dem gewählten Druckbereich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Druck und der Kristallinität vor. Die chemische Zusammensetzung der SiO_x Schicht sollte bei allen Proben gleich sein, um Einflüsse durch eine Abweichende Stöchiometrie ausschließen zu können. Für eine Korrelation der mikrostrukturellen mit den elektrischen Eigenschaften wurden jeweils eine SiO_x Schicht auf Glas mit Aluminium dotierten Zinkoxid (AZO) und eine fertig prozessierte Solarzelle hergestellt. Die Proben wurden zuerst mit den am PVcomB zur Verfügung stehenden Methoden vollständig charakterisiert: Ramanspektroskopie und Leitfähigkeitsmessung an den Einzelschichten sowie eine umfassende Charakterisierung der elektrischen Zellparameter. Am IHP wurden die Proben zuerst mit ToF-SIMS kontrolliert (siehe Abb.7), um gewährleisten zu können, dass die Proben die geforderten Spezifikationen hinsichtlich der Zusammensetzung erfüllen (siehe Abb.7). Nach der Prozesskontrolle wurden die Proben mit Raman Spektroskopie sowie mit 4-Spitz Messungen untersucht. Bei der Raman Spektroskopie wurde die Raman Kristallinität ermittelt, also das Verhältnis der Intensität der transversal optischen Moden bei 520 und 510 cm⁻¹, die für kristallines bzw. mikro- und nanokristallines Silizium charakteristisch sind, zu denen von amorphen Silizium. Die Messungen zeigten den erwarteten Anstieg der Kristallinität sowie der Leitfähigkeit (siehe Abb. 8).

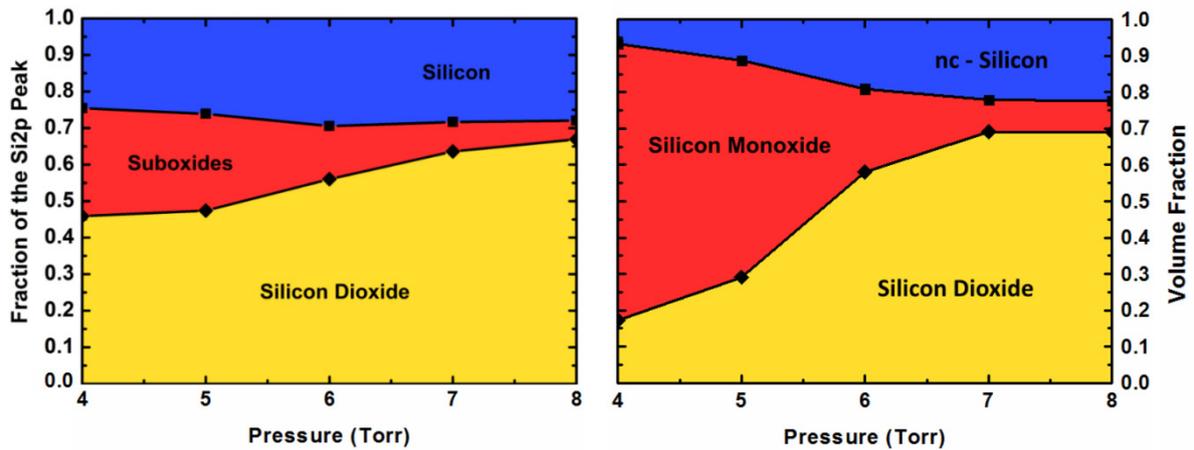


Abb.8) Entwicklung der Ramankristallinität (links) und der Leitfähigkeit (rechts)

Bei weiteren Messungen wurde der Einfluss der Kristallinität bzw. des Depositionsdrucks auf die chemische Bindung zwischen Silizium und Sauerstoff mittels XPS untersucht. Im Speziellen wurde der Silizium 2p Peak des Silizium Peaks untersucht. Von besonderem Interesse war hierbei die chemische Verschiebung, da in ihr Informationen zur genauen Beschaffenheit der Sauerstoffbindung zu dem Silizium enthalten sind. So zeigt eine größere Verschiebung eine Erhöhung der Oxidationsstufe des Siliziums an. Bei einer entsprechenden Entfaltung des Peaks ist es möglich die depositionsdruckabhängige Verteilung der vier Oxidationsstufen des Siliziums zu bestimmen. Wie in Abbildung 9 zu sehen ist korrespondieren die Ergebnisse der XPS Untersuchung sehr gut mit denen aus der Raman Spektroskopie. So wird auch dort das Maximum der Kristallinität bei 8 Torr erreicht, wenn die größte mögliche Menge an elementarem Silizium zu Verfügung steht. Zu den XPS Messungen mit ihrer hohen Oberflächenempfindlichkeit wurden ergänzend spektroskopische Ellipsometrie (SE) Untersuchungen durchgeführt, um

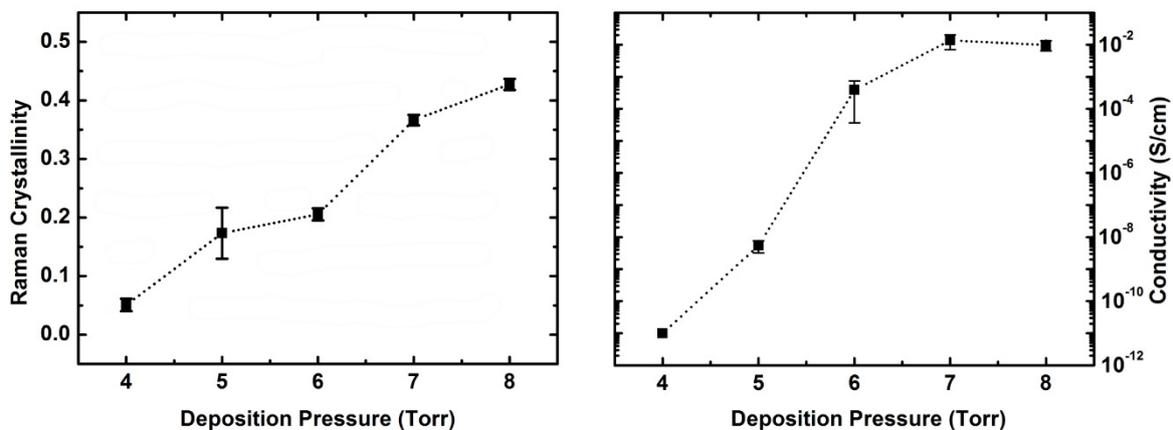


Abb. 9) Entwicklung der Ramankristallinität (links) und der Leitfähigkeit (rechts)

Informationen über die Volumenanteile der verschiedenen Phasen zu erhalten (siehe Abb. 9 rechts). Die Unterschiede bei 4 und 5 Torr lassen sich durch eine Luftsioxidschicht erklären, während die bei 8 Torr auf die amorphe Hülle der Nanokristallite zurückzuführen sind. Die Abbildung der Siliziummikrostruktur von SiO_x stellt die Elektronenmikroskopie vor eine beträchtliche Herausforderung. Bei konventionellen TEM Abbildungen gibt es keinen oder kaum Kontrast zwischen den Phasen, dadurch wird die direkte Charakterisierung der Mikrostruktur verhindert. Meist wurden die Schichten bei Arbeiten anderer Gruppen mit TEMs, die mit einem Energiefilter im Abbildungssystem (EFTEM) ausgestattet waren, untersucht. Dabei wurde meist im Low Loss Bereich (vgl. Abb. 10) das Silizium Plasmon mit einem 4 eV Energiefenster um den Bereich 16.7 eV selektiert, um die Beiträge der Siliziumoxide weg zu filtern und die Siliziumverteilung abzubilden. Allerdings überlappen sich die Plasmonen der beteiligten Verbindungen wie in Abbildung 9 gut

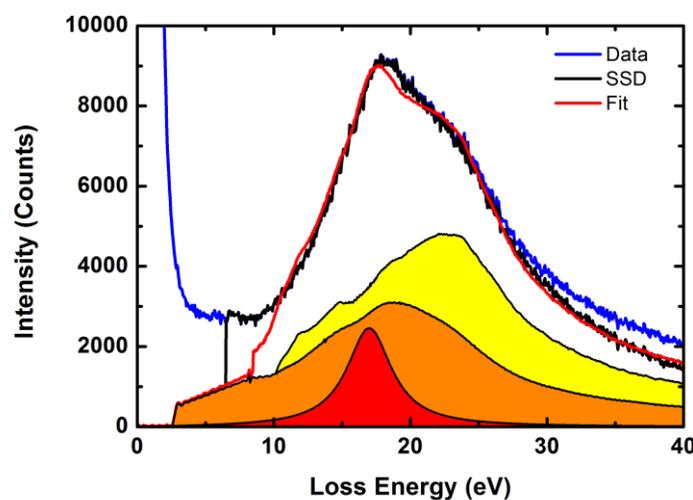


Abb. 10) SiO_x Low Loss EELS Spektrum, die Fourier Logarithmus entfaltete SSD und der Fit mit Silizium (rot), Siliziummonoxid (orange) und -dioxid (gelb)

zu erkennen ist, was wiederum eine eindeutige Abbildung der Phasen verhindert.

Um eine differenziertere Untersuchung zu ermöglichen wurde daher favorisiert das am IHP vorhandene STEM-EELS System zu verwenden und die Datenanalyse weiter zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurde eine Auswertungsroutine entworfen und in einem Python Programm implementiert. Die STEM-EELS Methode basiert darauf, dass in jedem Pixel des gerasterten Bereichs ein EELS Spektrum aufgenommen wird. Dabei wurde ebenfalls der Low Loss Bereich untersucht (0-50 eV). Das Signal dort setzt sich zusammen aus elastisch gestreuten Elektronen, dem so genannten Zero Loss Peak (ZLP) und Elektronen die einen oder mehrere Streuprozesse an den Valenzelektronen des Materials durchlaufen sind und dabei Plasmonen im Material angeregt haben. Um isoliert die Beiträge einer einzelnen Plasmonen Anregung betrachten zu können wurde die Fourier Logarithmus Methode genutzt. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, können somit sowohl der ZLP als auch auftretende Doppelstreuprozesse zuverlässig herausgerechnet und man erhält die gewünschte Single Scattering Distribution (SSD). Für die Bestimmung der einzelnen

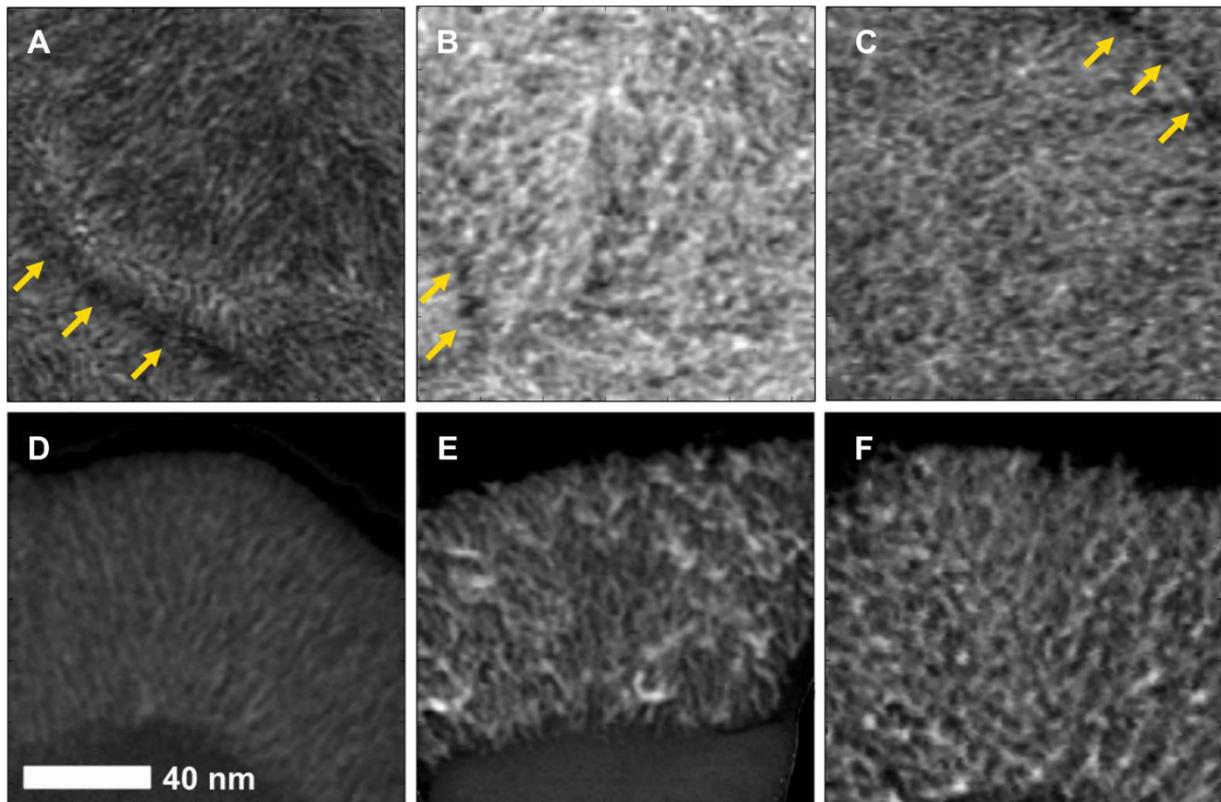


Abb. 11) Si-Plasmon Mappings von SiOx Planeview (a-c) und Querschnitts (d-f) Proben bei Fc von 5% (a, d), 20% (b, e) und 44% (c, f); Substratinduzierte Defekte sind gelb markiert

Anteile werden im nächsten Schritt die Superposition der Plasmonen einer Siliziummonoxid und einer Siliziumdioxid Referenzprobe sowie der Fit einer analytischen Beschreibung eines Silizium Plasmons

nach dem Drude Modell an das Spektrum angelegt. Für die Abbildung der Phasenverteilung wird in der Software das Verhältnis der integrierten Intensität des jeweiligen Plasmons zum integrierten Gesamtsignal dann in einem eigenen Array in den mit dem Spektrum korrespondierenden Rasterpunkt geschrieben. So erhält man die in Abbildung 11 gezeigten Darstellungen. Zu sehen ist ein Vergleich dreier SiOx Schichten unterschiedlicher Kristallinität. Die Siliziumreichen Bereiche heben sich deutlich ab und offenbaren eine Struktur aus Siliziumfilamenten in einer Siliziumoxidmatrix. Es ist zu vermuten, dass diese Filamente für die außerordentlich hohe Leitfähigkeit der SiOx Schichten verantwortlich ist, während die Siliziumdioxidmatrix für die guten optischen Eigenschaften sorgt. Zur genauen Untersuchung der Kristallstruktur und Kristallitgröße wird meist Röntgenbeugung eingesetzt. Bei Versuchen diese in der Halbleiteranalytik gut etablierte Methode bei SiOx einzusetzen konnte aufgrund der

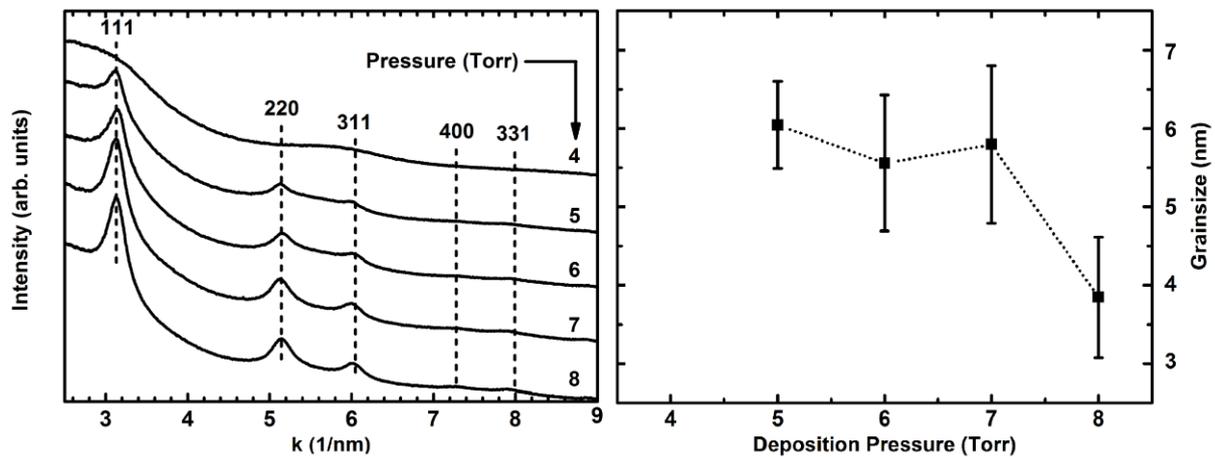


Abb. 12) Links, Radiale Intensitätsverteilung der SAED Ring Pattern. Rechts, die daraus bestimmte mittlere Korngröße.

Größe der Siliziumnanokristallite und ihrem niedrigen Volumenanteil nur bei Proben höchster Kristallinität ein leichter $\{111\}$ Reflex gemessen werden, der für eine quantitative Auswertung kein ausreichendes Signal zu Rausch Verhältnis aufwies. Daher wurde eine neue Präparationstechnik für TEM Planeview Proben entwickelt, um das für eine quantitative Auswertung von Selected Area Electron Diffraction (SAED) nötige Probenvolumen zur Verfügung zu stellen (siehe Abb. 12). Die radiale Intensitätsverteilung der für poly- bzw. nanokristalline Materialien typischen Beugungsringe wurde ausgewertet indem zuerst ein Spline Untergrund abgezogen wurde und die Peaks mit Pseudo-Voigt Funktionen gefittet. Danach wurde die Halbwertsbreite gegen die Peakposition in einem Williamson-Hall Plot aufgetragen und aus dem Achsenabschnitt die mittlere Kristallitgröße bestimmt. Damit fügte sich ein konsistentes Bild der depositionsdruckabhängigen Entwicklung der Siliziumstruktur zusammen:

4 Torr:

- Es ist vornehmlich amorphes Siliziummonoxid vorhanden
- Amorphe Silizium Nanofilamente mit einem Durchmesser von 2-3 nm sind zu beobachten

5, 6 und 7 Torr:

- Mit steigendem Druck nimmt der Siliziummonoxidanteil ab
- Siliziumdioxid und Silizium nehmen zu
- Es bilden sich kristalline Siliziumcluster mit einem Durchmesser bis zu 12 nm
- Filamentdichte und -homogenität nimmt zu

8 Torr:

- Fast nur noch Siliziumdioxid und Silizium vorhanden
- Keine Siliziumcluster
- Homogenes Netzwerk von Siliziumfilamenten

Wissenschaftliche Veröffentlichungen mit Ergebnissen dieser Arbeiten:

„On the Plasma Chemistry During Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Microcrystalline Silicon Oxides“

O. Gabriel, S. Kirner, M. Klingsporn, F. Friedrich, B. Stannowski, R. Schlatmann in Plasma Processes and Polymers, 12, 82-91, 2015

„Deposition Pressure Dependent Crystallinity of Nanocrystalline SiO_x for Solar Cells“

M. Klingsporn, S. Kirner, C. Villringer, T. Niermann, D. Abou-Ras, I. Costina, M. Lehmann, B. Stannowski - Noch nicht veröffentlicht

Analyseservice für Projektpartner

Ein explizites des Projektes war für Partner einen prozessbegleitenden Analyseservice bereit zu stellen. Im Folgenden sind exemplarisch einige Messungen dargestellt.

Prozesskontrolle bei der Erforschung von Braggreflektoren

Am PVcomB wird unter anderem daran gearbeitet die Lichtausbeute in den Zellen zu erhöhen. Ein vielversprechender Ansatz ist die Verwendung von so genannten Braggreflektoren. Dabei werden dünne Schichten in die Solarzelle eingebracht, die eine vom reinen Silizium abweichende Dielektrizitätskonstante aufweisen, an denen das Licht in hohen Winkeln gestreut wird. Am IHP wurden Schichtdicke, -zusammensetzung und -homogenität mit Querschnitts Raster Transmission

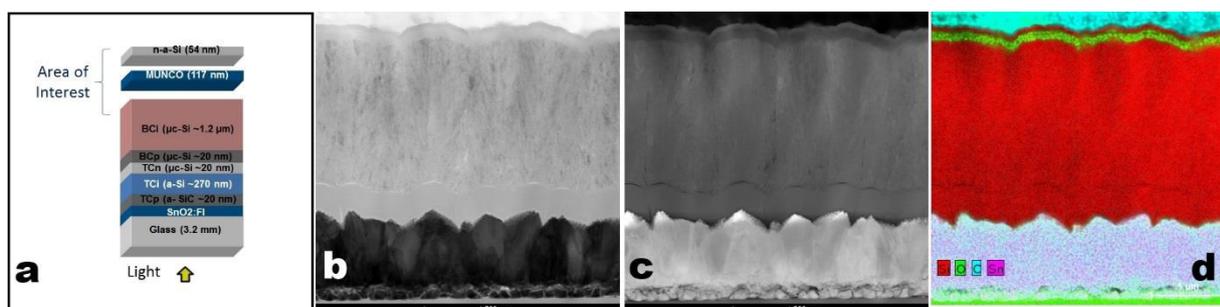


Abb. 13 a) Schema des Schichtstapels b) BF Aufnahme c) HAADF Aufnahme d) EDX Mapping

Elektronen Mikroskopie (XSTEM) von mehreren Proben kontrolliert (siehe Abb. 13). Von den konventionell präparierten Proben wurden Hellfeld (BF) und Hochwinkel Dunkelfeld (HAADF) Aufnahmen gemacht. Zudem wurden mit Energie dispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht.

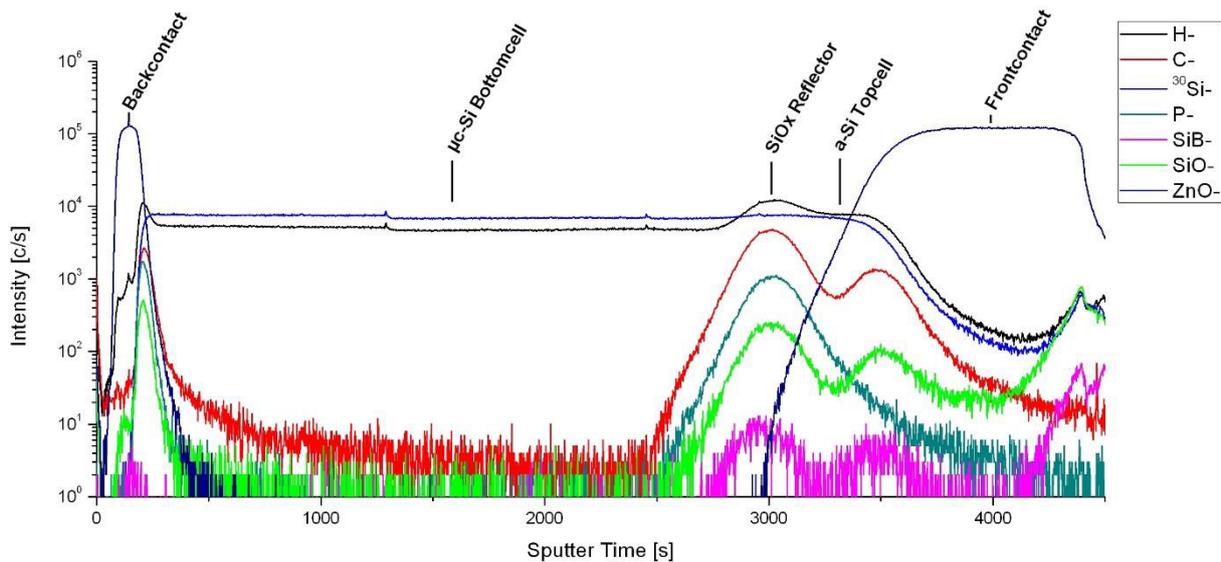


Abb. 14) ToF-SIMS Tiefenprofil einer mikromorphen Silizium Tandem Solarzelle

Zusätzlich wurden die Forschungen am PVcomB für die Optimierung verschiedener Prozessschritte mit ToF-SIMS Analysen unterstützt (siehe Abb. 14). So wurden beispielsweise verschiedene Reinigungsrezepte für die PECVD Anlage verglichen und so konnte die Konzentration an Verunreinigungen sowie die Variation der Schichtqualitäten reduziert werden.

Messung der Galliumverteilung

Bekanntermaßen gehört die Galliumverteilung über die Tiefe, der so genannte

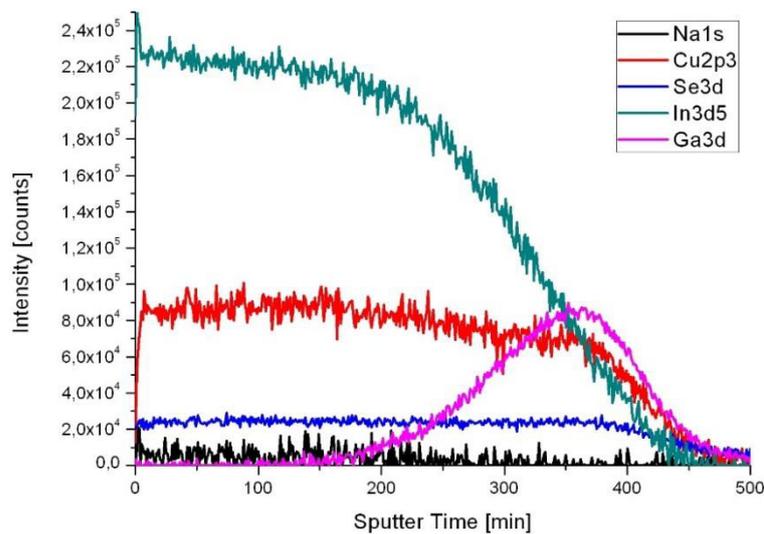


Abb. 15) XPS Tiefenprofil einer CIGSe Solarzelle zur Messung des Galliumgradienten

Galliumgradient, im Absorber einer CIGSe Schicht mit zu den wichtigsten leistungsbestimmenden Parametern der fertigen Solarzelle. Nicht zuletzt deswegen beschäftigen sich im Teilvorhaben 6 (TV6) zwei weitere Gruppen mit dieser Thematik. Um den Aufbau der CIGSe Linie am PVcomB mit einer direkten und unkomplizierten Analyseverfahren unterstützen zu können wurde die neue Physical

Electronics VersaProbe Röntgen Photoelektronen Spektroskopie Anlage am IHP für diese Aufgabe in Betracht gezogen. Es wurden Messungen an einer Probenserie vom PVcomB durchgeführt mit dem Ergebnis, dass die Methode einen sehr direkten Zugang zu einem Vergleich des Galliumgradienten zwischen den Proben bietet (siehe Abb. 15). Andererseits ist sie relativ zeitintensiv, da es notwendig ist mit einer niedrigen Ionenenergie zu Sputtern, um die Chemie der Schicht nicht durch den Messprozess zu sehr zu stören. Zudem ist es kein zerstörungsfreier Prozess. Damit ist die Methode nicht optimal geeignet um sie als in-line Tool mit einem hohen Probendurchsatz einzusetzen, kann aber wie demonstriert wurde bis zur Anwendungsreife der Röntgenfluoreszenz Anlage der Arbeitsgruppe Kannegießer im TV6 gewinnbringend zur Unterstützung der Forschungen an CIGSe Solarzellen am PVcomB eingesetzt werden.

2.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Verwendung der Personal- und Sachmittel erklärt sich aus den in 2.1 beschriebenen durchgeführten Untersuchungen und erzielten Ergebnissen. Die Reisemittel wurden für Projekttreffen, Besuche bei Projektpartnern und für die Teilnahme an Tagungen, bei denen Ergebnisse der Arbeit am Projekt vorgestellt wurden, benötigt. Eine detaillierte Aufstellung ergibt sich aus dem Verwendungsnachweis.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die erreichten Fortschritte bei der Analytik von Dünnschichtmaterial für die Photovoltaik und die gewonnenen neuen Erkenntnisse für Projektpartner sind erst durch die Durchführung des Projektes ermöglicht worden, da diese Forschungen nicht im Fokus des IHP liegen und somit die erforderlichen Ressourcen erst durch das Projekt bereit gestellt werden konnten.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Am IHP konnten im Rahmen des Projektes Erfahrung und Kenntnisse im Bereich der Photovoltaik Analytik ausgebaut werden. Auch konnte eine fruchtbare wissenschaftliche Zusammenarbeit mit mehreren Partnern während der Laufzeit des Projektes aufgebaut werden. Die Ergebnisse aus diesen Kooperationen wurden in Fachzeitschriften und auf Konferenzen präsentiert. Durch die Arbeit am Projekt konnte am IHP die Ausbildung einer qualifizierten Fachkraft unterstützt werden.

2.5 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

„Impact of dislocations and dangling bond defects on the electrical performance of crystalline silicon thin films“

S. Steffens, C. Becker, D. Amkreutz, A. Klossek, M. Kittler, Y. Chen, A. Schnegg, M. Klingsporn, D. Abou-Ras, K. Lips, B. Rech in Applied Physics Letters, 105, 022108, 2014

„Microstructural Changes in Polycrystalline Si Thin Film Solar Cells Induced by Rapid Thermal Annealing“

M. Klingsporn, S. Steffens, C. Becker, M. Schubert, I. Costina, D. Abou-Ras at European Material Research Society, Spring Meeting 2012

„Above 16% efficient sequentially grown Cu(In,Ga)(Se,S)₂ based solar cells with atomic layer deposited Zn(O,S) buffers“

S. Merdes, F. Ziem, T. Lavrenko, T. Walter, I. Lauermann, M. Klingsporn, S. Schmidt, F. Hergert, R. Schlatmann in Progress in Photovoltaics: Research and Application 2015

„On the Plasma Chemistry During Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Microcrystalline Silicon Oxides“

O. Gabriel, S. Kirner, M. Klingsporn, F. Friedrich, B. Stannowski, R. Schlatmann in Plasma Processes and Polymers, 12, 82-91, 2015

„Deposition Pressure Dependent Crystallinity of Nanocrystalline SiO_x for Solar Cells“

M. Klingsporn, S. Kirner, C. Villringer, T. Niermann, D. Abou-Ras, I. Costina, M. Lehmann, B. Stannowski - Noch nicht veröffentlicht

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht Forschungsvorhaben Ausbau des Kompetenzzentrums Dünnschicht und Nanotechnologie für Photovoltaik Berlin – PVcomB – Förderkennzeichen: 03IS2151G IHP – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Klingsporn, Max; Costina, Ioan	5. Abschlussdatum des Vorhabens Dezember 2014
	6. Veröffentlichungsdatum Juli 2015
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) IHP – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik, Im Technologiepark 25 15236 Frankfurt (Oder)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03IS2151G
	11. Seitenzahl 15
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 15
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <u>Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik</u> Die Photovoltaiklandschaft in Deutschland ist von der Wafer-Technologie dominiert. Im Bereich Dünnschicht-PV gibt es zahlreiche vielversprechende Entwicklungspotentiale, für die jedoch auch die geeigneten Depositions-, Analyse- und Simulationsverfahren zur Verfügung stehen müssen. <u>Zielsetzung</u> Ziel des Teilvorhabens war der Aufbau eines instituts- und standortübergreifenden Analysenetzwerks für Dünnschichtsolarzellen, um, durch die Kombination einer Vielzahl von in der Halbleiterindustrie etablierter Methoden mit neuentwickelten Messverfahren und begleitenden theoretischen Simulationen, neue Ansätze und Wege zur Wirkungsgradsteigerung von Silizium und CIS basierten Dünnschichtsolarzellen zu entwickeln. <u>Ergebnis</u> Die bisher nur in der Mikroelektronik genutzten Analysemöglichkeiten wurden hinsichtlich Probenpräparation und Messbedingungen auf die Untersuchung von Solarzellen angepasst. Dafür wurden spezielle Probenhalter, Eichproben Messkonzepte und Messrezepte angefertigt bzw. entwickelt. <u>Anwendungsmöglichkeiten</u> Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zur Erweiterung der Kompetenzen auf dem Gebiet der Dünnschichtsolarzellenforschung im IHP bei und haben zur Entstehung einer permanenten Plattform für künftige Charakterisierungen auf diesem Anwendungsgebiet geführt.	
19. Schlagwörter Dünnschicht-Photovoltaik, SIMS-, TEM-, FIB-, XPS-Analytik	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title Final Report Research Project Ausbau des Kompetenzzentrums Dünnschicht und Nanotechnologie für Photovoltaik Berlin – PVcomB – Förderkennzeichen: 03IS2151G IHP – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik		
4. author(s) (family name, first name(s)) Klingsporn, Max; Costina, Ioan	5. end of project December 2014	
	6. publication date July 2015	
	7. form of publication	
8. performing organization(s) (name, address) IHP – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik, Im Technologiepark 25 15236 Frankfurt (Oder)	9. originator's report no.	
	10. reference no.	
	11. no. of pages 15	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references	
	14. no. of tables	
	15. no. of figures 15	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract <u>Current status of science and technology</u> Photovoltaics industry in Germany is dominated by silicon wafer technology. However, there are various promising concepts for thin-film photovoltaics that require adequate techniques for deposition, analytics and simulation. <u>Aim of the project</u> The aim of this part of the project was to establish a network of analytical facilities for thin film based solar cell characterization. The existing analytical methods used for semiconductor technology have to be adapted to thin film based solar cell characterization in order to contribute to the improvement of solar cell efficiency. <u>Results</u> The analytical methods used in IHP for microelectronic devices were adapted to the characterization of thin film based solar cell by constructing characteristic sample holders, matching measurements recipes, developing new analytical concepts. <u>Possible Applications</u> The achieved know-how has led to the establishing of a competence platform for solar cell characterization based on thin films, which can be used in the future as a part of analytical facility network.		
19. keywords Thin film solar cells, SIMS, TEM, FIB, XPS		
20. publisher	21. price	